

DETERMINATION DU RAPPORT CIMENT/KAOLIN POUR DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES OPTIMALES DU CIMENT

TCHEHOUALI A.¹ *, AMEY K. B.²., HOUENOUKPO S.³, SOSSOU P.⁴

1- Laboratoire d'Etude et de Mécanique Appliquée

* Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi, Université d'Abomey Calavi (Bénin)

2- Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Lomé, Université de Lomé (Togo)

3- Ministère des Travaux Publics- Direction des Etudes Techniques (Bénin)

4- Laboratoire d'analyse de la Société des Ciments du Bénin (SCB-LAFARGE - Bénin)

(Reçu le 27 octobre 2010 ; Révisé le 20 décembre 2010 ; Accepté le 25 décembre 2010)

RESUME

Une manière de valoriser les matières minérales, localement disponibles, est de les traiter et de les incorporer dans les matériaux de constructions. Les investigations menées dans ce travail portent sur le kaolin disponible dans la région de Kétou de la partie Sud-Est du Bénin. Le kaolin est conditionné de trois manières différentes donnant lieu à trois types: le kaolin brut, le kaolin étuvé à 105°C et le kaolin cuit à 800°C. Les liants hydrauliques obtenus à partir de ces trois types de kaolins, réduits en poudre et substitués au ciment Portland dans les proportions pondérales de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% et 30% ont servi à préparer des mortiers qui ont été soumis aux essais mécaniques. Le temps de prise et de stabilité et les résistances mécaniques de ces ciments ont été déterminés. Les résultats ont montré qu'il est possible, tout en respectant les exigences normatives, d'obtenir du ciment du type CEMII 32,5R avec 25% de kaolin cuit à 800°C et 75% de ciment Portland.

Mots clés : Ciment, substitution, kaolin, mortier, temps de prise et de stabilité, résistances mécaniques.

ABSTRACT

A manner of developing the mineral matters, locally available is to treat and incorporate them in building materials. The investigations carried out in this work concern the kaolin available in the South-eastern part of Benin. The kaolin is conditioned in three different ways giving place to three types: the raw kaolin, the kaolin dried at 105°C and the kaolin calcined at 800°C. Kaolin- blended Portland cement mortars are obtained from these three types of kaolin with partial replacement of cement in proportion of 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % and 30 % by weight. The setting time and stability and mechanical strength of these cements have been determined. The results showed that while meeting the normative requirements, it is possible to obtain cement type CEMII 32.5 R with 25% replacement of kaolin calcined at 800° C.

Key words: Blended cement, kaolin de Kétou au Bénin, mortar, setting time, stability, mechanical strength.

INTRODUCTION

Les procédés classiques de production du ciment Portland à partir du clinker requièrent une importante quantité d'énergie de plus en plus rare et coûteuse. Ces procédés sont aussi source de pollution de l'environnement avec l'émission d'importantes quantités de chaleur et de gaz dans la nature. Par ailleurs, les besoins de réaliser les constructions avec des matériaux cimentaires plus performants se sont accrus. Les cendres volantes, les fumées de silice et les

pouzzolanes naturelles sont couramment utilisées comme ajouts au ciment pour apporter des approches de solutions à ces problèmes. En effet, ces ajouts permettent d'économiser de l'énergie et produisent des effets bénéfiques dans la confection des mortiers et bétons pour les constructions [1]

Plus récemment, de nombreux travaux se sont focalisés sur les recherches aboutissant à la mise au point d'ajouts minéraux tels que le kaolin thermiquement traité pour développer des aptitudes pouzzolaniques [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Dans

certaines conditions, le kaolin cuit, utilisé comme additif au ciment, peut permettre d'améliorer certaines caractéristiques du mortier et du béton, notamment la durabilité, la résistance aux sulfates [2], [8].

Le but de ce travail est de déterminer les caractéristiques du kaolin de la partie sud-est du Bénin prélevé précisément à Adakplamè situé à environ 180 km de Cotonou, puis d'évaluer les aptitudes de ce kaolin à servir d'ajouts au ciment CPA 325 dans le processus de fabrication du ciment Portland.

MATERIEL, MATERIAUX ET METHODE

MATERIAUX

Le ciment

Le ciment utilisé est le ciment CPA 325 produit à la cimenterie de la société SCB LAFARGE du Bénin. Sa composition chimique est donnée dans le tableau I. Sa masse spécifique est de 3,1 g/cm³ et sa surface spécifique de 2949 cm²/g.

Tableau I : Composition chimique du ciment CPA 325.

Constituants	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SO ₃	CO ₂	CaO	C	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneur (%)	5,41	65,3	2,76	19,7	1,09	2,44	0,07	1,47	62,0	62,5	9,32	9,66	8,39
		4		1					7	8			

Le sable

Le sable utilisé est du Sable Normalisé CEN importé de France selon la norme EN 196-1.

(KAl₃(SO₄)₂(OH)₆) mais il contient également du quartz et du cristobalite. Parfois, on retrouve des traces de l'illite. La composition chimique du kaolin utilisé à l'état brut ou naturel est donnée dans le tableau II.

Le kaolin

Le kaolin est généralement constitué de kaolinite (Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O) et de K-alunite

Tableau II : Composition chimique du kaolin brut.

Constituants	Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CO ₂
Teneur (%)	48,21	41,24	1,30	0,21	0,03	0,36	0,03	0,03	8,59

MATERIEL

Le matériel utilisé est constitué de :

- une étuve réglé 105°C±5 ;
- un tamis 80µm ;
- une balance numérique de marque Toledo Metler ;
- un appareil à choc de marque Toni Technik ;
- un four à moufle de type carbolite 1300°C ;

- un broyeur de laboratoire ;
- un concasseur de laboratoire ;
- un vibreur-broyeur de laboratoire ;
- un tamiseur alpine ;
- moules 40mmx40mmx160mm ;
- un malaxeur de marque Toni Technik automatique ;
- une presse mécanique automatique de marque Toni Technik.

METHODE

Conditionnement du kaolin

* Cuisson à 800°C : Les blocs de kaolin, de dimensions 10 à 15cm, sont introduits dans le four réglé à 800°C. Au bout de 2 heures, le four est éteint et les blocs de kaolin y séjournent jusqu'au refroidissement complet conformément au protocole décrit dans les travaux de [8], [9].

* Etuvage à 105°C : Les blocs de kaolin de mêmes dimensions que précédemment sont introduits dans une étuve réglée à 105 °C et séchés jusqu'à masse constante.

* Finesse du kaolin : Le concassage et le broyage des blocs sont faits de manière à avoir une finesse (dimensions des particules < 80µ) presque équivalente à celle du ciment.

Le mortier

* Dosage des constituants du mortier : Le dosage des constituants du mortier normal utilisé respecte les normes européennes EN- 196-1 qui prévoient :

- rapport ciment/sable (C/S) : 1/3
- rapport eau/ciment (E/C) : ½

* Mise en œuvre du mortier : Les procédures suivies pour la mise œuvre du mortier sont celles prescrites par les normes relatives au mortier normal et indiquées plus haut.

Les essais

Les essais de temps de prise et de stabilité et les essais de flexion et de compression sont effectués pour permettre de classer, suivant les normes européennes, les liants obtenus en ajoutant ces différents types de kaolin au ciment CPA 325.

* Mesure du temps de prise et de stabilité (expansion)

Les essais sont menés conformément à la norme européenne EN 196-3

La mesure du temps de prise a pour objet de connaître le début et la fin de prise des liants hydrauliques. Dans le cas de notre étude, c'est le temps du début de prise du liant, paramètre intervenant dans la classification des ciments, qui est visé.

* Essais de flexion et de compression sur mortiers

Ces essais sont menés conformément à la norme européenne EN 196-1.

Une gâchée de mortier permet de confectionner 3 éprouvettes prismatiques de 40x40x160 (mm). Deux gâchées ont été préparées pour chacun des trois types de kaolin (cuit à 800°C, séché à 105°C, et brut) et pour chacun des cas de substitution (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, et 30 %). Au total 126 éprouvettes prismatiques ont été confectionnées sur la base des dosages en ciment suivants :

- 0 % de teneur en kaolin : 450 g de ciment ;
- 5 % de teneur en kaolin : 22,5 g de kaolin et 427,5g de ciment ;
- 10 % de teneur en kaolin : 45g de kaolin et 405 g de ciment ;
- 15 % de teneur en kaolin : 67,5g de kaolin et 382,50g ciment ;
- 20 % de teneur en kaolin : 90g de kaolin et 360 g de ciment ;
- 25 % de teneur en kaolin : 121,5g de kaolin et 337,5g de ciment ;
- 30 % de teneur en kaolin : 135g de kaolin et 315 g de ciment.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Teneur en eau du kaolin

La teneur en eau du kaolin brut ou naturel est de 3,43 %, les prélèvements d'échantillons ayant été effectués dans la période sèche de l'année. Ceci indique que le kaolin est relativement sec au moment de l'extraction.

Temps de prise

Les essais de temps de prise et de stabilité effectués ont donné les résultats indiqués sur la figure 1.

Pour les trois types de kaolin, on remarque que :

- le temps de début de prise augmente avec la teneur en kaolin dans tous les cas ;
- le temps du début de prise le plus long est obtenu avec le kaolin étuvé à 105°C avec une teneur en kaolin de 30 % ;
- le temps le plus court pour le début de prise, avec la plus grande teneur en kaolin (30 %), a été obtenu avec le kaolin cuit à 800°C;

- toutes les valeurs obtenues respectent les exigences imposées par les normes de classification de ciment (Tableau III). Ce qui indique que la substitution n'a aucune influence négative sur la

qualité des liants obtenus en termes de temps de prise. Toutefois, les valeurs obtenues avec le kaolin cuit à 800 °C sont plus respectueuses des critères de conformité.

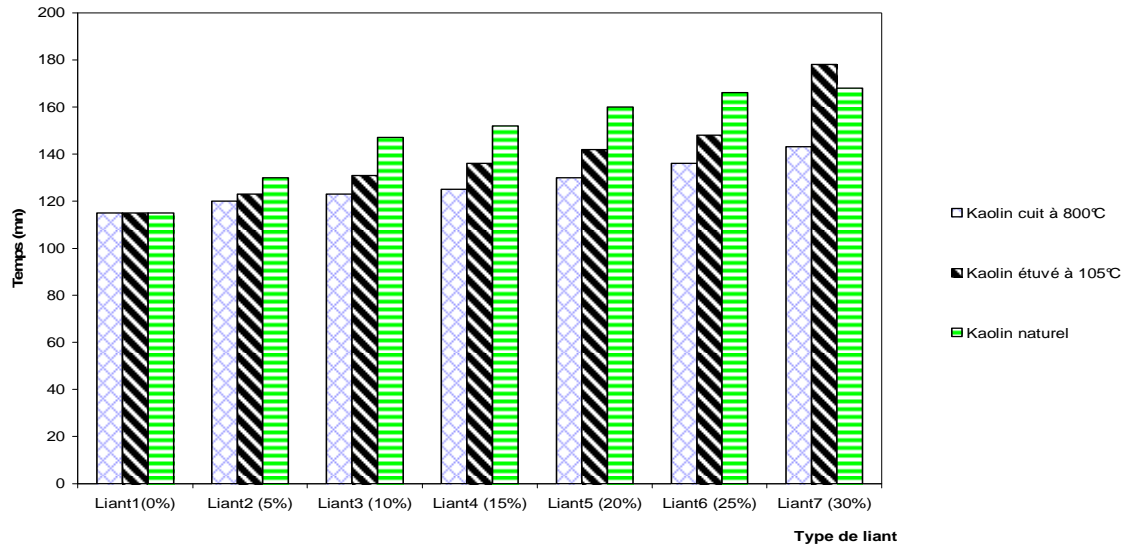


Figure 1 : Temps de début de prise en fonction du type de liant et de la teneur en kaolin (0 à 30 %).

Tableau III : Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa			Temps début de prise (mn)	Expansion (mm)
	Résistance à court terme		Résistance courante		
	2 jours	7 jours	28 jours		
32,5 N	-	≤ 16,0	-	-	-
32,5 R	≥ 10,0	-	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75
42,5 N	≥ 10,0	-	-	-	-
42,5 R	≥ 20,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	-
52,5 R	≥ 30,0	-	-	≥ 45	-

Expansion

Les résultats obtenus sont indiqués sur la figure 2. Ils se résument comme suit:

- l'expansion est nulle dans tous les cas de substitution pour le kaolin naturel;
- l'expansion varie de 2 à 5 % pour le kaolin étuvé à 105°, et se stabilise autour de 1 % pour les autres types de kaolin ;
- l'expansion varie de 2,6 mm à 3,1 mm lorsque la substitution croît de 5 à 30 % dans le cas du kaolin cuit à 800° C;

- le but visé étant d'apprécier le risque d'expansion tardive due à l'hydratation des oxydes de calcium et/ou de magnésium libres, les résultats montrent, heureusement, qu'il y a peu de calcium et de magnésium oxydables dans les ciments partiellement substitués au kaolin ;

- les valeurs obtenues sont dans les marges prescrites par les normes de fabrication de ciments de classes situées entre 32,5 à 52,5 (Tableau III).

En définitive, les différents types de liants ont présenté des caractéristiques similaires à celles des ciments des classes allant de 32,5 à 52,5.

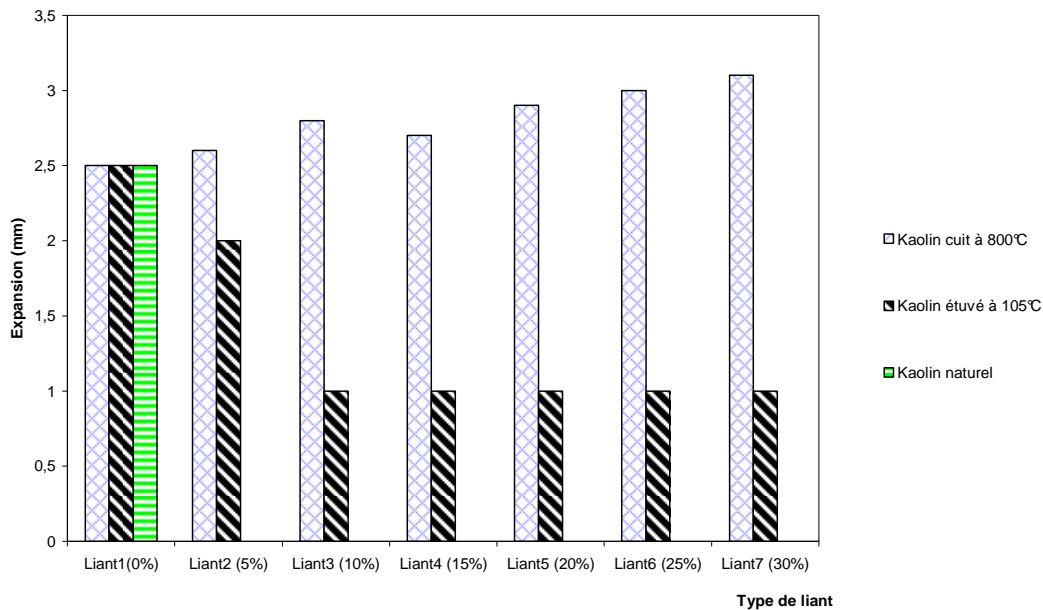


Figure 2 : Expansion en fonction des types de kaolin et de la teneur en kaolin

Résistances mécaniques

Des figures 3a et 3b, on note que les résistances mécaniques des mortiers présentent les caractéristiques ci-après:

- les coefficients de variation calculés sont compris entre 5 et 10 et confèrent aux résultats d'essais de compression une très bonne appréciation (Tableau IV).
- d'une manière générale, les résistances à la compression décroissent lorsque la teneur en kaolin

augmente, alors que dans les travaux de Vu *et al.* (2001) [8], cette tendance n'est observée qu'à des teneurs en kaolin supérieures à 25 %. Par ailleurs, comme observations particulières on note :

- qu'à 2 jours d'âge, le mortier de kaolin brut a présenté les résistances les plus élevées.

Avec le kaolin étuvé à 105°C, les valeurs sont restées intermédiaires entre celles du kaolin brut et du kaolin cuit à 800°C. Néanmoins toutes les valeurs enregistrées avec le kaolin brut et étuvé à 105°C satisfont aux exigences normatives de fabrication du ciment du type 32,5R et 42,5N. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées avec le kaolin cuit à 800°C et la résistance obtenue à une teneur en kaolin de 30 % ne satisfait pas aux exigences normatives de fabrication de ciment du type 32,5R.

- à 28 jours d'âge, le mortier de kaolin cuit à 800°C a fourni les valeurs les plus élevées et sont conformes aux exigences de fabrication du ciment du type 32,5R et 42,5R. Avec le kaolin étuvé à 105°C, il faut que la teneur en kaolin reste inférieure à 20 % pour satisfaire aux exigences. Pour le kaolin brut, les résistances sont les plus faibles et pour satisfaire aux exigences, la teneur en kaolin devra être inférieure à 15 %.

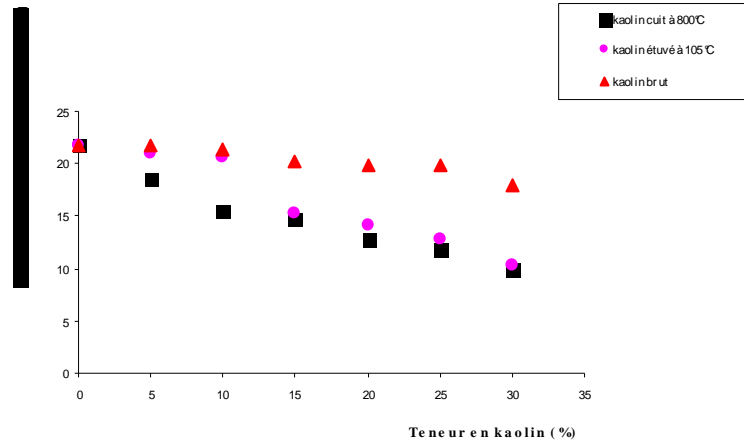


Figure 3a : Evolution des résistances à la compression à 2 jours du mortier en fonction du type de kaolin et de la teneur en kaolin.

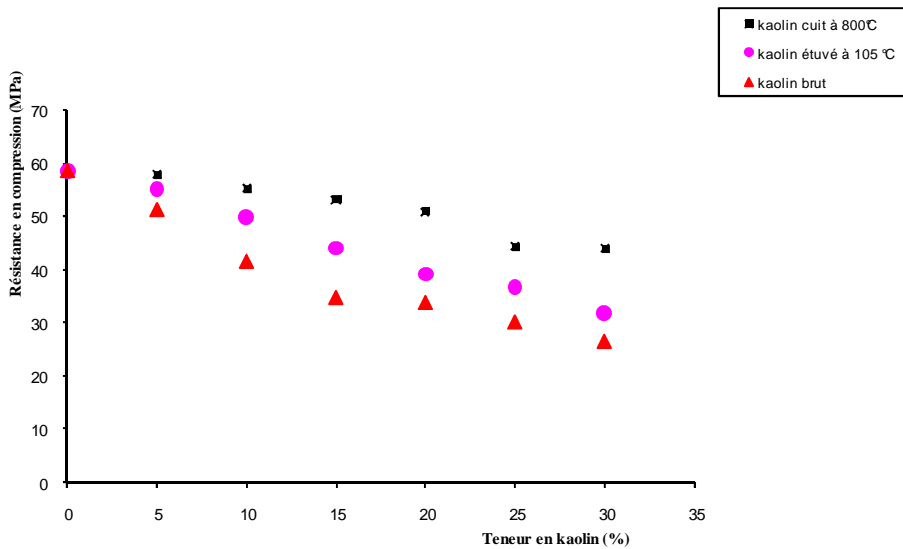


Figure 3b : Evolution des résistances à la compression à 28 jours du mortier en fonction du type de kaolin et de la teneur en kaolin

Détermination du rapport ciment/kaolin pour des propriétés physiques et mécaniques optimales du ciment.

Tableau IV : Critères d'appréciation des résultats d'essais à partir du coefficient de variation (Normes EN 197-1 et 197-2)

Appréciation	Coefficient de variation (%)
Excellent	<5
Très bon	5 à 10
Bon	10 à 15
Médiocre	15 à 20
Mauvais	>20

CONCLUSIONS

Les investigations menées sur le kaolin de la région Kétou (Sud-Est Bénin) ont montré qu'il est possible d'utiliser cette ressource minérale, disponible en

grande quantité, comme ajout au ciment CPA 325 pour obtenir un liant acceptable du type CEM II. En effet, en substituant partiellement au ciment CPA 325 (CEM I) la fine poudre de kaolin, on obtient un liant présentant des caractéristiques (temps de prise et de stabilité, résistances mécaniques) conformes aux normes et acceptables pour la fabrication du ciment CEM II de classe 32,5 dans les conditions ci-après :

- lorsqu'il s'agit du kaolin cuit à 800°C, la teneur en kaolin doit rester inférieure ou égale à 25 % ;
- quant au kaolin séché à l'étuve à 105°C, la teneur en kaolin doit rester inférieure ou égale à 20 % ;
- alors que pour le kaolin brut, la teneur en kaolin doit être inférieure ou égale à 15 %.

REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leurs sincères remerciements aux Autorités de la Société SCB Lafarge du Bénin pour leur soutien matériel pour la réalisation des travaux de recherche.

RÉFÉRENCES

1. NEVILLE M., 1996.- *Properties of concrete; 4th and final ed. England: Addison Wesley Longman Limited.*
2. BATIS G., PANTAZOPOULOU P., TSIVILIS S., BADOGIANNIS E., 2005.- The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. *Cement & Concrete Composites*, 27: 125-130.
3. MURÂT M., 1983.- Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals: I. Preliminary investigation on metakalinite. *Cement & Concrete Research*, 13: 259-66.
4. MURAT, M., COMEL C., 1983.- Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals: III. Influence of calcinations process of kaolinite on mechanical strength of hardened metakaolin. *Cement & Concrete Research*, 13: 631-637.
5. BADOGIANNIS E., KAKALI G., DIMOPOULOU G., CHANIOTAKIS E., TSIVILIS S., 2005.- Metakaolin as a main cement constituent. Exploration of poor Greek kaolins. *Cement & Concrete Composites*. 27: 197-203.
6. MOULIN E., BLANC P., SORRENTINO D., 2001.- Influence of key cement chemical parameters on the properties of metakaolin blended cements. *Cement & Concrete Composites*, 23: 463-469..
7. AKASHA A.M., ABDUSSALAM H. M., 2008.- "Strength Characteristics of Cement Mortar Using Metakaolin as Partially Replacement Cement. *ICCBT C*, 32: 353-358.
8. VU D. D., STROEVEN P., BUI V. B., 2001.- Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete. *Cement & Concrete Composites* 23: 471-478.
9. VU D. D., 1996.- "The effect of kaolin on characteristics of blended Portland cement paste and mortar". Report 03. 21.1. 32. 30., Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft.
10. BADOGIANNIS E., 2002.- The exploitation of kaolin in Concrete Technology, PhD Thesis. Athens: NTUA.